

# 웨어러블 장치에 사용될 수 있는 영 대기전력소모 방법 Zero Standby Power Consumption Method for Wearable Devices

이효재\* · 강지수\*\* · 정영석\*\*\*†

Hyo-Jae Lee\*, Ji-Soo Kang\*\* and Young-Seok Jung\*\*\*†

(Received 3 December 2019, Revision received 2 September 2020, Accepted 15 October 2020)

**Abstract :** This paper introduces standby power consumption minimizing method using vibration switch sensor for energy harvesting system. Proposed energy harvesting module is composed of coil, bobbin, magnet, spring, vibration switch and energy storage circuit. It is inserted in smart shoes and harvests generated electrical energy when a person walks or runs. It is important to take long battery time in wearable smart devices such as smart shoes. The battery time can be extended with the reduction of power consumption of the system when the system runs or stand-by mode. Proposed system can be divided into two operation modes (running and stand-by mode) from power consumption point of view. The system acquires sensor information and/or communicates with other devices in the running mode, but in stand-by mode, the system waits next running mode to be started. This paper deals with power consumption minimizing method in the stand-by mode. The vibration switch has used, in proposed method, to wake up from stand-by mode. The consumption power for the stand-by mode can be remarkably reduced using this method. Two statuses, a stand-by mode using vibration sensor and a IC sleep mode, have compared to verify the reduction of the power consumption.

**Key Words :** Energy harvesting, Smart shoes, Vibration switch, Sleep mode

## 1. 서 론

웨어러블 장치들을 사용하는 사용자들은 한 번 충전된 배터리로 오랜 시간 사용할 수 있기를 바란다. 그러나 웨어러블 장치들의 특성상 배터리의

무게와 공간이 제한되어 있어서 사용자가 원하는 시간만큼 동작시키기에는 부족한 것이 사실이다. 이렇게 제한된 용량의 배터리로 장치를 더욱더 오래 사용하기 위하여 에너지 하베스팅 기술과 전력 소모 절감 기술 등 다양한 기술이 연구되었다.<sup>1,2)</sup>

\*\*\*† 정영석(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8086-6928)

: 교수, 부경대학교 기계설계공학과

E-mail : yousjung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6165

\*이효재(https://orcid.org/ 0000-0002-5099-9516) : 박사수료,

부경대학교 메카트로닉스공학과

\*\*강지수(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1872-7374) : 석사,

부경대학교 기계설계공학과

\*\*\*† Young-Seok Jung(https://orcid.org/ 0000-0001-8086-6928) :

Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong national University.

E-mail : yousjung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6165

\*Hyo-Jae Lee(https://orcid.org/ 0000-0002-5099-9516) : Ph.D.Cand., Department of Mechatronic Engineering, Pukyong National University Graduate School, Engineering, Daehan University.

\*\*Ji-Soo Kang(https://orcid.org/ 0000-0003-1872-7374) : Master, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University Graduate School.

웨어러블 장치들의 배터리에서 소모되는 전력은 동작 시 소모되는 전력과 대기 시 소모되는 전력으로 나눌 수 있다. 동작 소모 전력이 대기 소모 전력보다 월등히 높거나 시간 비율이 높은 시스템에서는 동작 소모 전력을 줄이는 것이 배터리 사용 시간을 늘리는 데에 중요한 요소로 작용하나, 사용환경의 특성상 동작 소모 전력이 매우 작거나 대기시간이 매우 긴 웨어러블 장치에서는 대기 소모 전력을 줄이는 것 또한 배터리 사용 시간을 늘리는 데에 큰 영향을 준다. 특히 신발에 사용되는 웨어러블 장치들이 미 보행 시간 동안 수행하는 동작이 없으므로 대기시간이 긴 형태에 해당한다고 할 수 있다. 이러한 대기 소모 전력을 줄이는 방법에 관하여 다양한 연구가 이루어졌다.<sup>3-6)</sup>

대기 소모 전력을 줄이는 방법은 슬립모드와 전력차단모드 등이 있다. 슬립모드를 활용할 경우 시스템의 프로세서는 슬립모드에서 깨어나기 위한 타이머 또는 감지센서부분만 남기고 전력을 차단하게 된다. 이때 프로세서나 감지센서는 최소한의 전력을 지속적으로 소모하게 된다. 전력차단모드를 활용할 경우 깨어나기 위한 감지센서 부분을 제외한 시스템의 전력은 모두 차단된다.

본 논문에서는 대기 소모 전력을 줄이는 방법 중에서 새로운 형태의 전력차단모드를 소개한다. 이 방법은 대기모드에서 깨어나기 위한 감지센서의 전력소모마저 없게 되어 영에 근접하는 대기 전력 소모가 가능하게 된다.

## 2. 에너지 하베스팅 기술이 적용된 보행 압력측정 장치

본 논문에서 제안한 방법을 적용할 장치는 에너지 하베스팅 기술이 적용된 보행 족저압력 측정 장치이다. 보행 시 수집된 족저 압력 정보는 보행형태 분석을 통하여 건강정보를 알아내는데 중요한 자료가 된다.<sup>7-11)</sup> 그러나 이러한 장치들 중 상용전원을 사용한 장치들은 이동거리에 대한 단점이 있고, 배터리를 사용한 장치들은 사용 시간의 한계로 인하여 배터리를 자주 교체 또는 충전해 주어야 하는 단점이 존재한다. 이러한 단점을

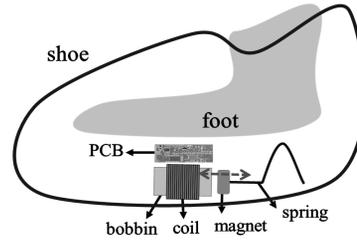


Fig. 1 Energy harvesting module structure in smart shoes

해결하기 위해 보행에너지를 전기에너지로 변환하여 배터리를 충전하는 에너지 하베스팅 기술이 도입이 되는 것은 사실이나, 동작 또는 대기 시 소모 전력을 줄이는 것 또한 매우 중요한 일이다.

Fig. 1은 본 논문에서 제안한 신발에 적용된 에너지 하베스팅 시스템의 구조를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 에너지 하베스팅의 원리는 발을 디딜 때 눌려진 스프링에 의해 영구자석이 보빈 내부를 왕복으로 통과하게 되는데, 이때 코일에 유도된 기전력을 PCB에서 수확하여 배터리를 충전한다. 보행이 없는 시간에 에너지 하베스팅 시스템은 대기모드로 진입되어 있는데 본 논문에서는 이 대기모드에서 소모되는 에너지를 줄이는 방법에 대하여 다룬다. 이 시스템은 기존에 에너지 하베스팅 효율을 높이기 위한 연구와 대기모드에서 소모전력을 줄이기 위한 연구에서 다루어 졌다.<sup>12-13)</sup> 기존 연구에서 대기모드 소모전력은 수십 마이크로와트의 유효한 값을 가졌으나 본 연구에서는 이를 0으로 만드는 방법을 제안한다.

Fig. 2는 본 논문에서 실험한 에너지 하베스팅 시스템의 실험장치 사진을 나타내고 있으며 Fig. 3은 에너지 하베스팅 시스템의 블록 다이어그램을 나타낸다. 시스템은 에너지발생부, 진동감지센서부, 전력관리부, 프로세서, 통신, 측정센서 그리고 부가기능 부분으로 나누어져 있다.

에너지 발생부는 영구자석과 코일을 활용하여 배터리를 충전하고, 진동감지 센서부는 진동스위치를 활용하여 대기모드에서 깨어나기 위한 동작을 수행하며, 프로세서는 전력관리부를 통하여 모든 주변소자의 전력을 관리함과 동시에 센서자료 수집, 통신기능 등을 담당한다. Fig. 3에서 신호

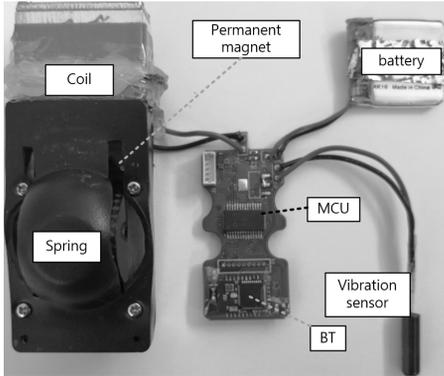


Fig. 2 Photo of proposed energy harvesting system

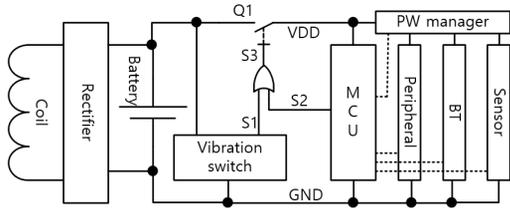


Fig. 3 Block diagram of proposed energy harvesting system

$S_3$ 에 의해 스위치  $Q_1$ 이 켜지게 되면 배터리의 에너지가 앞에서 말한 시스템의 다양한 요소로 전달되는 구조이며 스위치  $Q_1$ 이 꺼지면 시스템의 전력은 완전히 차단된다.

### 3. 회로 구성 및 동작 설명

Fig. 4는 제안한 대기전력 저감 방법을 회로로 구현한 것이다. 여기에서 스위치  $S_1$ 은 신발의 움직임을 감지하여  $Q_1$ 을 켜기 위한 진동 스위치이고

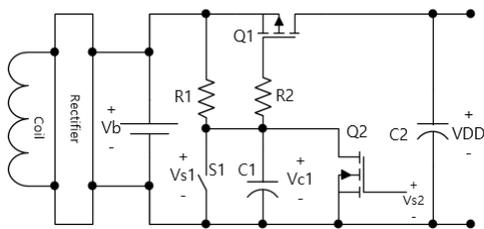


Fig. 4 Proposed circuit

$Q_2$ 는 마이크로프로세서에서  $Q_1$ 을 켜기 위한 신호이며,  $V_{DD}$ 는 마이크로프로세서 시스템의 전원이다. 회로에서  $S_1$ 이나  $Q_2$  둘 중에서 하나 이상 켜지면  $Q_1$ 이 켜져서 배터리의 전력이  $V_{DD}$ 로 공급되는 구조이다.

실험을 위한 시스템의 전체 동작 과정은 다음과 같다. 최초 대기모드에 있다가 신발의 움직임(진동)이 감지되면 깨어나서 동작모드로 진입한 후 원하는 기능을 수행하고 나서 다시 대기모드로 진입하도록 하였다. 이 전체 과정을 시뮬레이션 과정 Fig. 6에 나타내었다. 시뮬레이션에서  $V_{S1}$ 은 진동신호이고,  $V_{DD}$ 는 시스템의 전원이며,  $V_{C1}$ 은  $C_1$  양단의 전압이고,  $V_{S2}$ 는  $Q_2$ 를 켜기 위한 논리 신호이다. 다음에 각 구간별 상세 동작을 설명하였다.

구간 1 ( $\sim t_0$ ) : 이 구간은 시스템이 대기모드인 상태이다. 이 구간에서  $C_1$ 은  $R1$ 에 의해 배터리 전압  $V_b$ 로 충전되어 있고, 진동이 없다면 진동 스위치  $S_1$ 도 열려 있기 때문에 스위치  $Q_1$ 이 꺼져 있게 되어  $V_{DD}$ 에는 전력이 공급되지 않고 따라서 마이크로프로세서가 제어하는 스위치  $Q_2$ 도 꺼져 있다. 진동 감지 스위치는 접점이 물리적으로 분리되어 있기 때문에 전류가 흐르지 않는다. 따라서  $Q_1$ 과  $Q_2$ 의 누설전류를 제외하면 이 구간에서 배터리의 소모 전력은 없다.

구간 2 ( $t_0 - t_1$ ) : 이 구간은 시스템이 대기모드로부터 진동을 감지하여 깨어나는 동작을 하는 구간이다. 움직임이 감지되면 매우 짧은 시간 동안 스위치  $S_1$ 이 켜지게 되는데, 이때 커패시터  $C_1$ 에 있던 전하가 순간적으로 스위치  $S_1$ 을 통하여 모두 방전하게 되어 커패시터 전압  $V_{C1}$ 이 0V가 되며 이로 인해 통과트랜지스터인  $Q_1$ 이 켜져서 프로세서의  $V_{DD}$ 에 전원이 공급된다. 이를 Fig. 5의 (a)와 시뮬레이션 Fig. 6에 나타내었다.

구간 3 ( $t_1 - t_2$ ) : 진동에 의해 스위치  $S_1$ 이 켜지는 시간은 수 밀리초로 매우 짧은 시간이기 때문에 커패시터  $C_1$ 의 방전에 의해  $Q_1$ 이 켜지자마자 이내 진동 스위치  $S_1$ 은 바로 열린 상태가 된

다. 이후 커패시터 전압  $V_{C1}$ 은  $R_1$ 을 통해 0V부터 상승하기 시작한다. 이를 Fig. 5의 (b)와 시뮬레이션 Fig. 6에 나타내었다.

구간 4 ( $t_2 - t_3$ ) : 구간 3 이후  $V_{C1}$ 이 상승하다가  $Q_1$ 이 꺼지는 문턱전압에 도달하면  $Q_1$ 이 꺼져서  $V_{DD}$ 에 더 이상 전력 공급이 되지 않는다. 이를 방지하기 위해  $V_{C1}$ 이  $Q_1$ 의 문턱 전압에 도달하기 전에 스위치  $Q_2$ 를 켜서  $Q_1$ 을 계속 켜진 상태로 유지시킨다. 이때 커패시터  $C_1$ 에 있던 전하는 스위치  $Q_2$ 를 통해 모두 방전된다. 이를 Fig. 5의 (c)와 시뮬레이션 Fig. 6에 나타내었다.

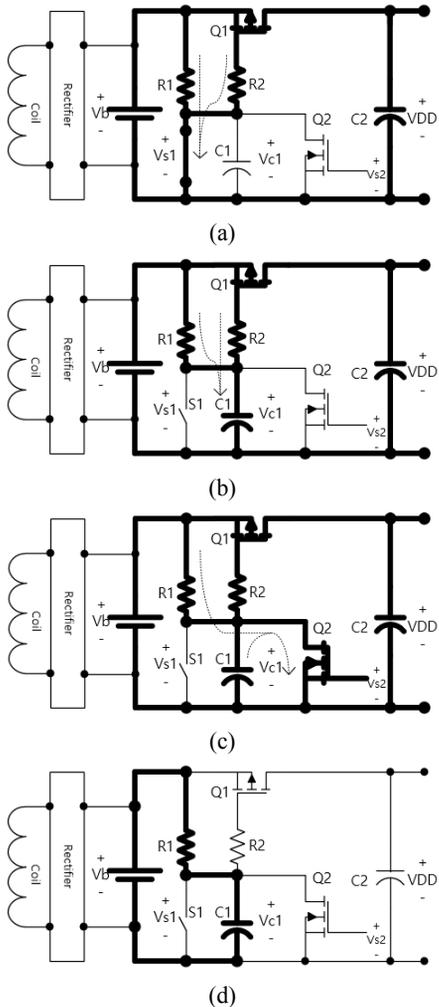


Fig. 5 Power flows for each periods

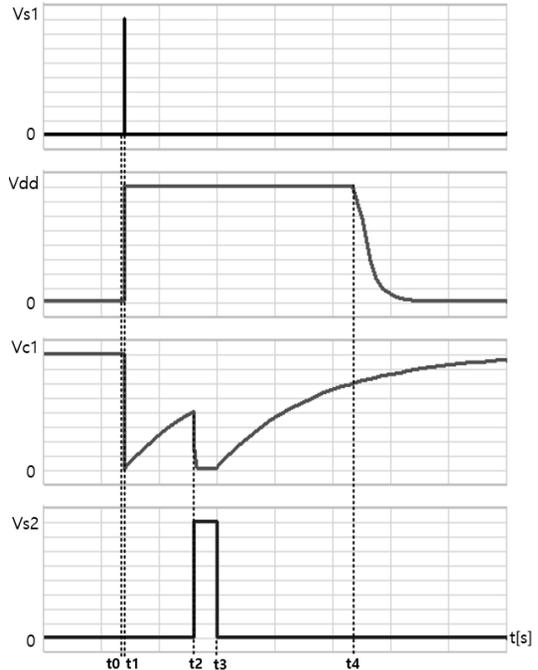


Fig. 6 Simulation waveforms

구간 5 ( $t_3 - t_4$ ) : 이 구간은 마이크로프로세서가 동작하여 센서자료수집이나 통신 등의 기능 수행하는 구간이다.

구간 6 ( $t_4 \sim$ ) : 이 구간은 시스템이 동작모드로부터 대기모드로 진입하는 구간이다. 대기모드의 진입 과정은, 스위치  $Q_2$ 를 끄게 되면  $V_{C1}$ 이 상승하게 되는데 이로 인해  $Q_1$ 이 꺼지게 되어  $V_{DD}$ 로의 전력 전달이 중단됨으로써 완성된다. 이후 커패시터 전압  $V_{C1}$ 이 배터리 전압  $V_b$ 로 충전되면 더 이상 배터리에서 소모되는 전력은 없어진다. 이를 Fig. 5의 (d)와 시뮬레이션 Fig. 6에 나타내었다.

#### 4. 설계

앞서 설명한 동작을 잘 수행하기 위해서는  $t_0 \sim t_1, t_3 \sim t_4, R_1, C_1, Q_1, Q_2$ 를 잘 선정해야 한다. 이들을 선정하기 위한 방법을 Table 1을 참고로 하여 소개한다.

Table 1 Design parameters

$Q_1$	IRLML6402
$Q_2$	IRLML2502
$T_a (t_0 \sim t_1)$	4.7ms
$C_1$	0.1 $\mu F$
$V_b$	4 V

$Q_1$ 과  $Q_2$ 의 선정은 비교적 간단한데, 배터리를 전원으로 사용하는 시스템의 특성상 저전압으로 동작하므로 스위치의 게이트-소스 문턱전압( $V_{gsth}$ ) 이 낮은 소자를 사용하면 되며 본 회로에서는 International Rectifier사의 IRLML6402와 IRLML2502로 각각 사용하였다. 이 소자들의  $V_{gsth}$ 는 약 0.95 V 정도이다.

Table 1에서  $T_a$ 는 진동이 감지된 후 마이크로 프로세서가 깨어나서  $Q_2$ 를 켜지기까지의 시간으로 이 시간은 시스템마다 다르게 나타나는데 본 시스템에서는 4.7 ms로 측정되었다.

커패시터  $C_1$ 의 선정은 충방전 시 발생하는 전력소모를 줄이기 위해 작을수록 좋으나 너무 작을 경우 스위치  $Q_1$ 의 기생 커패시턴스와 값이 유사해져 값 선정에 다소 번거로움이 발생하므로 0.1  $\mu F$ 으로 선정하였다.

이제  $R_1$ 의 값만 선정하면 되는데 다음의 조건을 고려해야 한다.

$V_{DD}$ 에 전원이 공급된 상태를 유지하기 위해  $Q_2$ 가 켜져 있을 때에, 배터리 전원이  $R_1$ 과  $Q_2$ 를 통해 접지가 되어 있는 형태이므로 이 경로를 통해 전류가 흘러 작으나마 지속적으로 흐른다. 이 전력 소모를 줄이기 위해서는  $R_1$ 이 클수록 좋으나  $R_1$ 이 너무 크게 되면 시스템이 전력 차단을 위해  $Q_2$ 를 끌 경우  $V_{C1}$ 의 전압 상승 시간이 지나치게 길어지게 된다. 이렇게 되면  $V_{DD}$ 에 전력을 공급하는  $Q_1$  또한 늦게 꺼지게 되어 불필요한 전력을 낭비하게 된다. 그러나 이 불필요한 전력을 줄이기 위해  $R_1$ 값을 지나치게 작게 설정하면 진동감지에 의해  $V_{DD}$ 에 전원이 공급된 후  $Q_2$ 를 켜

기 전에  $V_{C1}$ 이 지나치게 상승을 하여  $Q_1$ 이 꺼짐으로써 시스템 시동이 불가능하게 된다.

또한 시간  $T_a(t_0 \sim t_1)$  구간의 끝에서  $V_{C1}$ 의 전압은  $Q_1$ 이 꺼지지 않게 하는 한계치인  $V_b - V_{gsth} = 3.05$  V보다 조금 낮게 설정하는 것이 최적의 값이나 시스템의 안정성 등을 고려하여 2 V로 설정을 한다.

위의 조건들을 고려하여 최적화된  $R_1$ 값을 찾기 위해 RC회로의 충전수식 (1)을 사용한다.

$$V_{C1} = V_b(1 - e^{-t/R_1C_1}) \quad (1)$$

수식 (1)에서 t를  $T_a$ 로 대체한 후  $R_1$ 에 대해 유도하면 다음 수식 (2)와 같다.

$$R_1 = \frac{-T_a}{C_1 \cdot \log(1 - V_{C1}/V_b)} \quad (2)$$

수식 (2)에서  $V_{C1}$ 을 2V,  $V_b$ 를 배터리 전압 4V,  $C_1$ 는 0.1 $\mu F$ ,  $T_a$ 를 4.7 ms로 설정하면 저항  $R_1$ 의 값은 67,807  $\Omega$ 이 되며 표준저항 68 k $\Omega$ 으로 선정하도록 한다.

$R_1$ 을 이 값으로 설정하면 시스템이 대기모드로 들어가기 위해  $Q_2$ 를 끈 이후  $Q_1$ 이 꺼지는 데까지 필요한 시간이 계산된다. 이 꺼지는 시간  $T_b(t_3 \sim t_4)$ 는  $V_{C1}$ 이 0V부터  $(V_b - V_{gsth})V$ 가 되는 데까지 필요한 시간이며, 이 시간을 구하기 위해 식 (1)의 t를  $T_b$ 로 대체한 후  $T_b$ 에 관해 유도하면 다음 식 (3)과 같다.

$$T_b = -R_1 \cdot C_1 \cdot \log\left(1 - \frac{V_{C1}}{V_b}\right) \quad (3)$$

여기에서  $R_1$ 을 앞에서 선정한 68k $\Omega$ ,  $C_1$ 을 0.1  $\mu F$ ,  $V_b$ 를 4 V로 선정하고  $V_{C1}$ 을  $V_b - V_{gsth}$  즉, 4 V - 0.95 V = 3.05 V로 두면  $T_b$ 는 약 1 ms가 된다.

## 5. 결 과

Fig. 7과 Fig. 8은 설계된 소자값을 사용하여 실

험한 후 얻은 결과이다. 실험 결과 진동이 감지된 이후  $Q_2$ 를 켜 때까지의 약 4.7 ms의 시간 동안  $V_{C1}$ 의 전압이 설계값인 2.0 V에 근접하는 약 2.1 V로 충전되어 있음을 Fig. 7로부터 알 수 있다. 이후 마이크로프로세서에 의해  $Q_2$ 가 켜지게 되어 시스템의 전원  $V_{DD}$ 에는 전력이 지속적으로 공급되고 있다. 이후  $Q_2$ 가 꺼져서 시스템의  $V_{DD}$ 에 전원이 끊기기 시작하는 시간은 설계값과 같은 약 1 ms로 측정되었으며, 이를 Fig. 8에서 알 수 있다. 이로써 앞서 설계한 내용이 실제 회로에서도 동작함을 알 수 있다.

본 시스템을 활용하여 프로세서의 슬립기능을 활용한 대기모드와 본 논문에서 제안한 진동센서를 활용하여 전력을 차단하는 대기모드의 소모 전력을 비교하였으며, 이를 Fig. 9에 나타내었다. 전력측정 실험에는 소스미터와 전류 프로브를 활용하였고 전원은 4 V로 하였다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 시스템이 동작 중일 때에는 프로세서, 통신장치, 센서측정장치 등의 동작 소모전력으로 인해 약 85 mW가 소모되었고, 본 회로를 제외한 프로세서의 슬립기능을 활용한 대기모드에서는 약 20  $\mu$ W가 소모되었으며 진동센서를 활용한 대기모드에서는 약 5 nW의 소모전력이 측정되었다. 제안한 방법에서 대기모드의 5 nW 소모 전력은  $Q_1$ 과  $Q_2$ 의 누설전류의 합이라 할 수 있다.

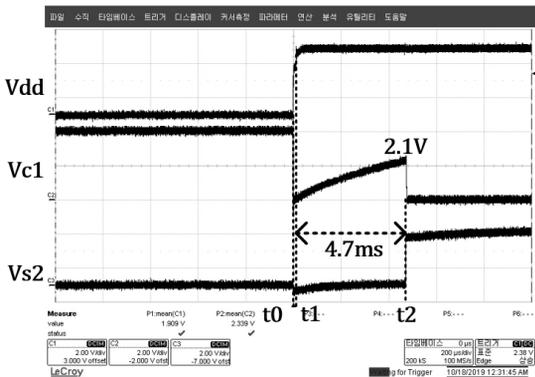


Fig. 7 experimental waveforms (periods  $t_0 \sim t_2$ , Volt/div = 2 V)

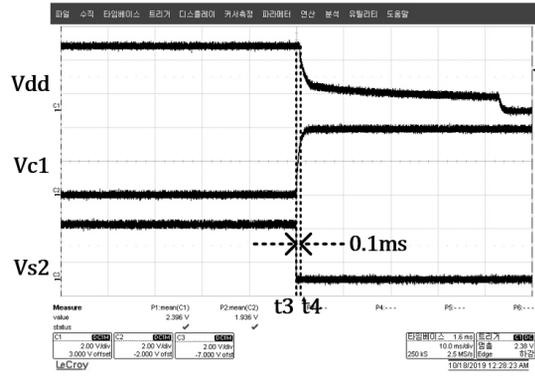


Fig. 8 experimental waveforms (periods  $t_3 \sim t_4$ , Volt/div = 2 V)

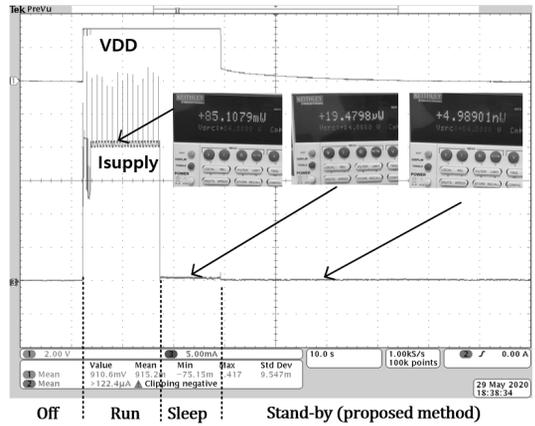


Fig. 9 Power consumption comparison (Volt/div = 2 V, Current/div = 5 mA)

## 6. 결 론

본 논문에서는 에너지 하베스팅 시스템의 대기 전력을 줄이기 위한 방법 중 하나인 진동스위치를 활용한 새로운 형태의 대기전력 절감 방법에 대하여 소개하였다. 실험을 통하여 증명한 바와 같이 이 방법을 활용하면 대기모드 시 2개의 MOSFET 내부 다이오드의 누설전류를 제외하면 영의 대기소모전력 실현이 가능하게 되므로, 대기 전력 소모를 줄이는 것이 중요한 시스템에서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2019년)에 의하여 연구되었음.

## Author contributions

H. J. Lee; Investigation, Validation. J. S. Kang; Validation. Y. S. Jung; Supervision.

## References

1. S. N. Yoon and D. K. Kim, 2009, "A Study on Energy Harvesting Technique using Piezoelectric Element", Journal of the Korea society for power system engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 65-71.
2. N. Jackson, J. Adkins and P. Dutta, 2019, "Capacity over Capacitance for Reliable Energy Harvesting Sensors", Proceedings of the 18th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Canada, pp. 193-204.
3. B. Suh, C. Won and S. W. Kim, 2009, "Minimizing sleep duration time for energy harvesting wireless sensor networks", IEEE SENSORS 2009 Conference, pp. 555-559.
4. S. W. Arms, C. P. Townsend, D. L. Churchill, J. H. Galbreath and S. W. Mundell, 2005, "Power Management for Energy Harvesting Wireless Sensors", Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, May, pp. 1-9.
5. V. Marsic, M. Zhu and S. Williams, 2012, "Wireless Sensor Communication System with Low Power Consumption for Integration with Energy Harvesting Technology", Telfor Journal, Vol. 4, No. 2, pp. 89-93.
6. A. Yamawaki and S. Serikawa, 2015, "Power Supply Circuit With Zero Standby Power Consumption on Infrared Remote Controlled Product by Using Energy Harvesting", Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, IMECS, Vol II, ISBN: 978-988-19253-9-8, pp. 655-660.
7. W. C. Lee, M. D., S. S. Park and M. D., 2004, "A Study on the Therapeutic Shoes for Diabetic Patients", J Korean Foot Ankle Soc., Vol. 8. No. 1. pp. 16-21.
8. A. J. Taylor, 2004, "The influence of walking speed on plantar pressure measurements using the two-step gait initiation protocol", The foot, Vol. 14, pp. 49-55.
9. R. El-Hawary, L. A. Karol, K. A. Jeans and B. S. Richards, 2008, "Gait analysis of children treated for clubfoot with physical therapy or the ponseti cast technique", The journal of bone & joint surgery, pp. 1508-1515. (<https://doi.org/10.2106/JBJS.G.00201>)
10. D. A. Yngve, 1990, "Foot-progression angle in clubfeet", Journal of Pediatric Orthopaedics, pp. 467-472. (<https://doi.org/10.1097/01241398-199007000-00007>)
11. A. H. Payne, 1978, "A comparison of ground reaction forces in race walking with those in normal walking and running", Biomchanics VIA, University Park Press, pp. 293-302.
12. S. Song, S. C. Lee and Y. S. Jung, 2016, "Performance Improvement of Converter Circuit for Energy Harvesting from Foot Strike", KSPSE The 2016 Autumn Conference, pp. 62-63.
13. H. J. Lee, J. S. Kang, M. G. Kim and Y. S. Jung, 2018, "Research on the energy consumption reducing method for energy harvesting system using vibration switch sensor in smart shoes", KSPSE The 2018 Autumn Conference, pp. 100-101.